

Einfluß der Parameter eines Phasen-Doppler-Anemometrie-Prozessors auf die gemessenen Größenverteilungen

Dependence of the particle size distribution on the user-controlled settings of a phase-Doppler anemometry signal processor

T. Wriedt

Schlagwörter: Partikelmeßtechnik, Phasen-Doppler-Anemometrie

Wie jedes Meßinstrument, weist auch ein Prozessor zur laseroptischen Partikelgrößenbestimmung mittels Phasen-Doppler-Anemometrie verschiedene Einstellparameter wie z. B. Triggerpegel und Verstärkung auf, die das Meßergebnis beeinflussen. Anhand zweier Versuchsreihen wird der Einfluß dieser Parameter auf die gemessenen Partikelgrößenverteilungen untersucht. Insbesondere wurde herausgefunden, daß die Verstärkung den mittleren Partikeldurchmesser stark beeinflusst.

The particle size distribution measured by a phase-Doppler anemometer depends on the user setting of the different parameters of the signal processor of the instrument like trigger level, amplification etc. Two series of measurement were conducted to find the influence of such parameters on the measured size distribution. It is found that signal amplifications strongly influences the mean diameter of the distribution.

1 Einleitung

Die Kontrolle oder Untersuchung von mehrphasigen Strömungen spielt bei unterschiedlichen verfahrenstechnischen Prozessen eine bedeutende Rolle. Beispiele für solche Prozesse sind die Lackzerstäubung, Sprühtrocknung, Zerstäubung von Brennstoffen und die Metallpulvererzeugung. Zur Bestimmung der jeweiligen Partikelgrößenverteilung der unterschiedlichen Prozesse hat sich in den letzten Jahren die Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) durchgesetzt. Mit ihr lassen sich, aufbauend auf die Laser-Doppler-Anemometrie, temporale Verteilungen messen. Die gemessenen Verteilungen sind jedoch in starkem Maße abhängig von der Empfindlichkeit der Signalverarbeitung. Die Empfindlichkeit eines PDA-Prozessors ist durch eine Vielzahl einzustellender Parameter des Prozessors beeinflussbar. Da die Streulichtintensität in erster Näherung etwa proportional dem Quadrat des Partikeldurchmessers ist, muß ein PDA-Meßgerät über einen größeren Signalamplitudenbereich funktionsfähig sein, ohne daß es von den hohen Signalamplituden großer Partikeln übersteuert wird, und ohne daß die Signale der kleinsten Teilchen nicht mehr getriggert werden. Im folgenden soll gezeigt werden, wie sich durch Variation der Empfindlichkeit die gemessenen Partikelgrößenverteilungen verändern.

2 Phasen-Doppler-Anemometrie

2.1 Grundlagen

Die Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) ist ein laseroptisches und somit berührungslos arbeitendes Meßverfahren zur simultanen Bestimmung von Geschwindigkeiten und Größen kugelförmiger Partikeln, das bisher sehr erfolgreich bei der Vermessung von homogenen, transparenten bzw. stark reflektierenden Teilchen eingesetzt wird [1].

Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau eines Phasen-Doppler-Anemometers. Das Sendesystem ist identisch mit dem des Laser-Doppler-Anemometers (LDA): Der Laserstrahl wird mittels eines Strahlteilers in zwei parallele Partialstrahlen gleicher Intensität aufgespalten, die anschließend mit einer Konvexlinse fokussiert und im Brennpunkt der Linse unter dem Winkel θ zum Schnitt gebracht werden. Dort entsteht durch die Überlagerung der Lichtwellen ein Interferenzstreifenvolumen. Das Empfangssystem der PDA besteht im Gegensatz zu dem der LDA nicht aus einem, sondern aus zwei Photodetektoren, die gewöhnlich unter demselben Off-axis-Winkel φ und symmetrisch zur Streuebene unter dem Höhenwinkel ψ angeordnet sind, parallel zur erwarteten Bewegungsrichtung der Partikeln.

Bewegt sich eine kugelförmige Partikel durch das Interferenzvolumen, so streut das Teilchen Licht in den Raum. Dieses Streulicht bewegt sich entsprechend der Teilchenbewegung an den Photodetektoren vorbei. Von ihnen wird dieses bewegte Muster zu einem Spannungssignal (Burst) übersetzt, so daß das von beiden Photodetektoren erfaßte Streulicht aufgrund der Interferenzstreifen eine zeitliche Modulation mit der Frequenz $f_D = 1/T$ aufweist, die entsprechend Gl. (1) zur Bestimmung der Partikelgeschwindigkeit genutzt wird:

$$|v_z| = \frac{f_D \cdot \lambda}{2 \cdot \sin(\theta/2)} \quad (1)$$

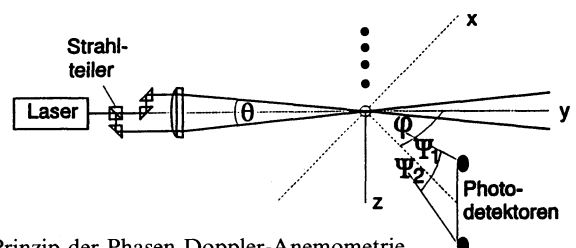


Bild 1. Prinzip der Phasen-Doppler-Anemometrie.

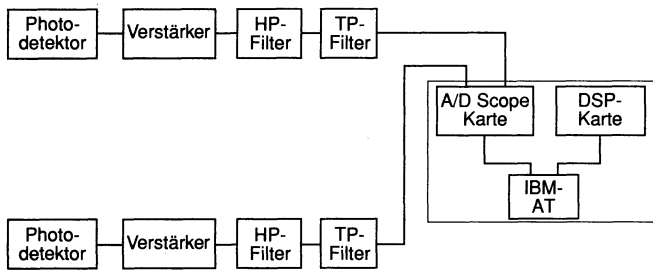


Bild 2. Prinzip der Signalanalyse.

Nur wenn das detektierte Streulicht aus überwiegend reflektiertem oder gebrochenem Licht besteht, ist ein linearer Zusammenhang zwischen dem Partikeldurchmesser d und der meßbaren Phasendifferenz $\Delta\Phi$ zwischen einem Paar von Doppler-Bursts gegeben:

$$d = \frac{1}{2b} \left(\frac{\lambda}{\pi n_c} \right) \Delta\Phi, \quad (2)$$

mit $\Delta\Phi = 2\pi(\Delta t/T)$ gemäß Bild 2, n_c als realer Brechzahl der kontinuierlichen Phase und b als Zahlenfaktor, der für Brechung und Reflexion unterschiedlich ist [1].

2.2 PDA-Signalverarbeitung

Das Prinzip der Signalanalyse ist in Bild 2 dargestellt. Die Empfindlichkeit der Photomultiplier ist von der eingestellten Hochspannung abhängig, mit der sie betrieben werden. Die beiden Burstsignale werden verstärkt, wobei der Verstärkungsfaktor ebenfalls die Empfindlichkeit des Gesamtinstruments beeinflusst. Zur Unterdrückung des tieffrequenten Signalanteils wird ein einstellbarer Hochpaßfilter verwendet. Das hochfrequente Rauschen wird mit einem Tiefpaßfilter eliminiert. Alle Signale, die einen bestimmten Triggerpegel überschreiten, werden mittels einer PC-Einsteckkarte mit einer maximalen Abtastfrequenz von 100 MHz und einer Auflösung von 8 bit digitalisiert.

Die weitere Signalanalyse basiert im vorliegenden Fall auf der Fast-Fourier-Transformation (FFT) [2]. Die FFT-Signalanalyse wird eingesetzt, da sie sich als rauschunempfindlicher im Vergleich zu herkömmlichen Counterprozessoren herausgestellt hat [3]. Pro detektiertem Burst können 128 Abtastpunkte verarbeitet werden. Die Berechnung der FFT erfolgt ebenfalls mit einer PC-Ein-

steckkarte, die mit einem Texas-Instruments-Signalprozessor versehen ist. Die weitere Signalverarbeitung und die Darstellung der ermittelten Partikelgrößenverteilungen erfolgt auf dem PC mit einem Turbo-Pascal-Programm. Die Signalfrequenz wird durch Bestimmung der maximalen Spektrallinie ermittelt. Aus den zugehörigen komplexen Werten der Fouriertransformation wird die gesuchte Phasendifferenz und daraus der Partikeldurchmesser berechnet.

Als Fehlerkriterien finden zwei Bedingungen Anwendung: Ein Signal wird nicht als gültig anerkannt, wenn sich nicht das Maximum des Spektrums in beiden Kanälen bei derselben Spektrallinie findet. Außerdem wird ein Signal verworfen, wenn das Signal/Rausch-Verhältnis (SNR) einen einstellbaren Wert unterschreitet. Als Schätzwert des Signal/Rausch-Verhältnisses dient das Verhältnis der maximalen Spektrallinie zur nächsthöheren Spektrallinie, die von einem Suchalgorithmus außerhalb eines Intervalls von ± 3 Spektrallinien vom Maximum entfernt gefunden wird.

3 Messungen

Bei der Untersuchung zweier Zerstäubungsprozesse wurden die Photomultiplier-Spannung, die Verstärkung, der Triggerpegel sowie das minimal zugelassene Signal/Rausch-Verhältnis systematisch variiert. Während der Versuchszeit wurden die verfahrenstechnischen Versuchsbedingungen konstant gehalten. Als erster Prozeß diente die Zerstäubung von Heizöl mittels einer Ölbrennerdüse [4]. Die Düse wurde bei einem Druck von 10 bar und einer Öltemperatur von 50°C betrieben. Die verwendete Düse hatte einen Massendurchsatz von 2 kg/h. Der Meßort befand sich in einem Abstand von 20 mm senkrecht unterhalb der Düse (auf der zentralen Mittellinie des Sprühkegels).

Die Ausgangseinstellung der optischen und elektronischen Parameter des eingesetzten PDA-Meßgerätes sind in Tabelle 1 dargestellt. Bei jeder Messung wurden jeweils 2000 Teilchen gemessen, daraus Mittelwert und Standardabweichung der Anzahlverteilung ermittelt und über dem variierten Parameter aufgetragen. Als Akzeptanz wird im folgenden das Verhältnis der getriggerten zu den gemessenen Burstsignalen verstanden. Die Differenz zwi-

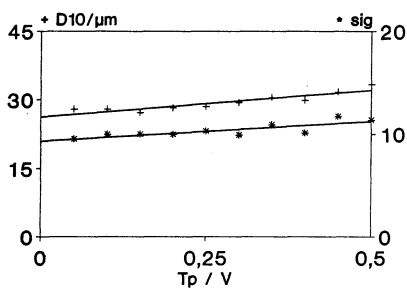


Bild 3. Mittlerer Durchmesser als Funktion des Triggerpegels bei der Ölbrennerdüse.

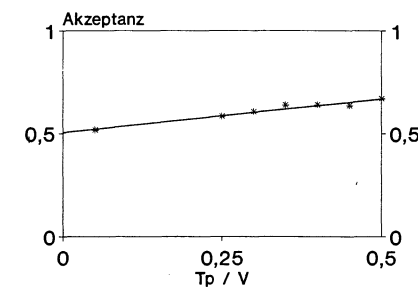


Bild 4. Akzeptanz als Funktion des Triggerpegels bei der Ölbrennerdüse.

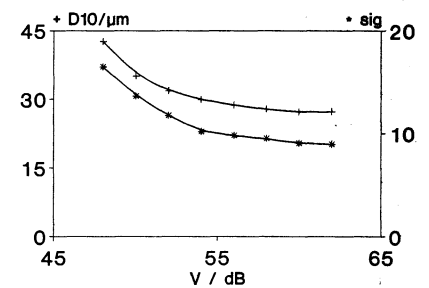


Bild 5. Mittlerer Durchmesser als Funktion der Verstärkung bei der Ölbrennerdüse.

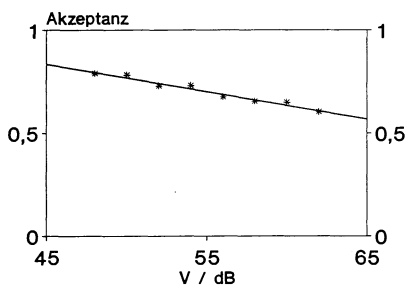


Bild 6. Akzeptanz als Funktion der Verstärkung bei der Ölbrennerdüse.

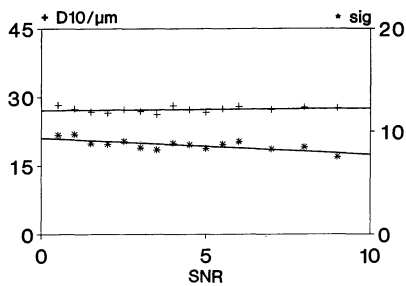


Bild 7. Mittlerer Durchmesser als Funktion des SNR bei der Ölbrennerdüse.

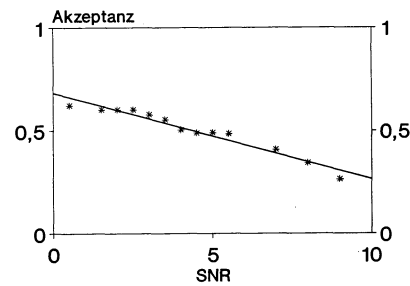


Bild 8. Akzeptanz als Funktion des SNR bei der Ölbrennerdüse.

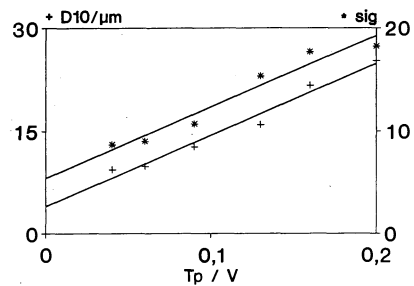


Bild 9. Mittlerer Durchmesser als Funktion des Triggerpegels bei der Ultraschallzerstäubung.

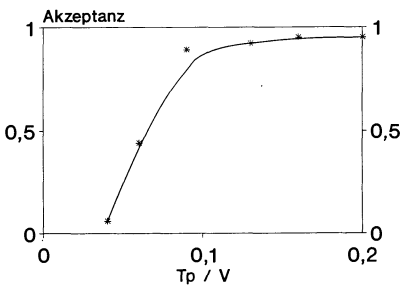


Bild 10. Akzeptanz als Funktion des Triggerpegels bei der Ultraschallzerstäubung.

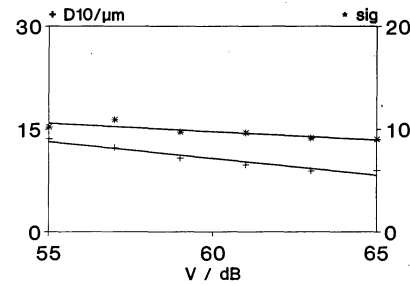


Bild 11. Mittlerer Durchmesser als Funktion der Verstärkung bei der Ultraschallzerstäubung.

schen der Anzahl der getriggerten und der gemessenen Partikeln ergibt sich aus der Wirkung der oben dargestellten Akzeptanzkriterien.

Die Ergebnisse dieser ersten Meßreihe sind in den Bildern 3 bis 8 aufgetragen.

Die Bilder 3 und 4 geben die Abhängigkeit vom eingestellten Triggerpegel wieder. Wie zu erwarten, werden bei einem niedrigen Triggerpegel mehr kleinere Teilchen detektiert, so daß der mittlere Anzahldurchmesser mit dem Triggerpegel abnimmt. Die Akzeptanz nimmt allerdings ebenfalls ab, da bei deutlich gesteigerter Burstzahl

zugleich auch deutlich mehr Bursts mit schlechterer Signalqualität einlaufen, die wiederum den Fehlerkriterien nicht genügen.

Die gleiche Tendenz der Aussage ergibt sich, wenn man den Einfluß der Signalverstärkung betrachtet (Bild 5 und 6). Mit höherer Verstärkung werden zunehmend kleinere Teilchen gemessen, so daß mit steigender Verstärkung der mittlere Partikeldurchmesser abnimmt und wiederum zugleich damit sich die Anzahl der akzeptierten Signale verringert.

Schließlich wurde der Einfluß des Akzeptanzkriteriums SNR untersucht. Hier ist der Einfluß auf den mittleren Durchmesser nicht so deutlich (Bild 7). Es ergibt sich nur eine geringere Erniedrigung des mittleren Durchmessers mit steigendem SNR, wenn weniger verrauschte Signale verarbeitet werden. Allerdings sinkt die Akzeptanz deutlich ab, wie aus Bild 8 zu entnehmen ist. Es werden also prinzipiell recht viele verrauschte Signale von dem Prozessor digitalisiert, die dann durch das Akzeptanzkriterium SNR verworfen werden. Daß sich der mittlere gemessene Durchmesser dabei nur geringfügig ändert, hängt damit zusammen, daß verrauschte Signale sowohl von großen als auch von kleinen Tropfen herrühren und nur – relativ gesehen – deutlicher bei den Signalen der kleinen Tropfen zu finden sind. Es deutet aber auch auf die Leistungsfähigkeit insbesondere der FFT-Signalanalyse hin, die im Gegensatz zur Signalanalyse nach dem Counterprinzip in der Lage ist, auch aus verrauschten Signalen von kleinen Tropfen (mit niedrigen Amplitudenwerten), zumindest im Mittel, den „richtigen“ Partikeldurchmesser zu berechnen. Bei schärfer gefaßtem Akzep-

Tabelle 1. Parameter der verwendeten PDA-Meßgeräte.

Meßobjekt	Ultraschallzerstäubung	Ölbrennerdüse
Laser	NeNe	ArIon
Wellenlänge	632,8	514,5 nm
Sendelinse, f	600	600 mm
Strahlschnittwinkel/2	3,529	4,052 Grad
Strahldurchmesser	2,28	3,3 mm
Off-axis-Winkel	90	30 Grad
Aperturdurchmesser	52	52 Grad
Empfangslinse, f	690	1125 mm
Höhenwinkel	2,883	1,53 Grad
PM-Spannung	1,6	1,5 kV
Verstärkung	65	60 dB
Hochpaß	64	45 kHz
Tiefpaß	2	2,2 MHz
Triggerpegel	0,13	0,1 V
Abtastung	5	20 MHz
SNR	0	0 dB

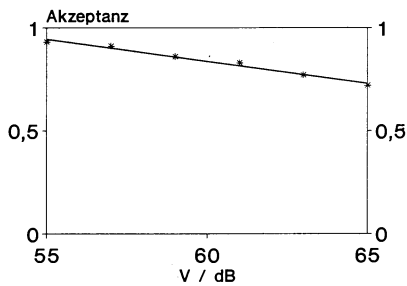


Bild 12. Akzeptanz als Funktion der Verstärkung bei der Ultraschallzerstäubung.

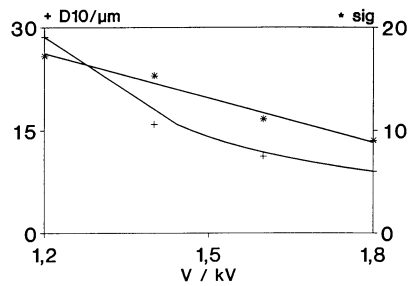


Bild 13. Mittlerer Durchmesser als Funktion der PM-Spannung.

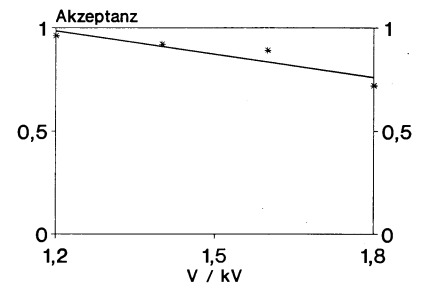


Bild 14. Akzeptanz als Funktion der PM-Spannung.

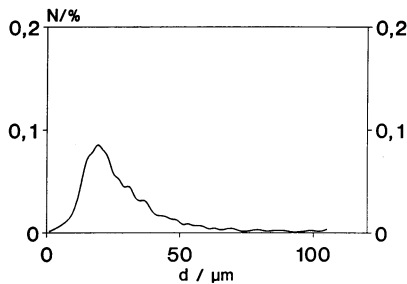


Bild 15. Anzahlverteilung bei einer PM-Spannung von 1,2 kV bei der Ultraschallzerstäubung.

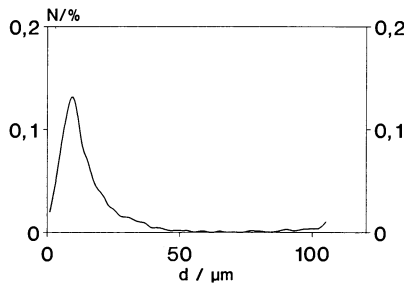


Bild 16. Anzahlverteilung bei einer PM-Spannung von 1,4 kV bei der Ultraschallzerstäubung.

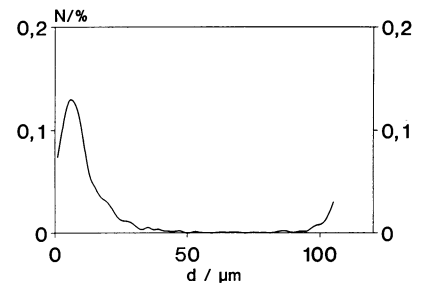


Bild 17. Anzahlverteilung bei einer PM-Spannung von 1,6 kV bei der Ultraschallzerstäubung.

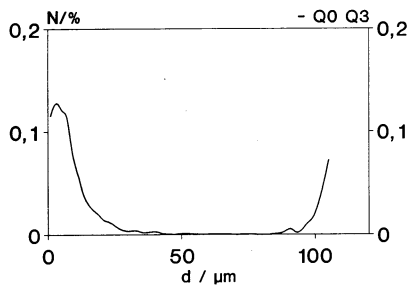


Bild 18. Anzahlverteilung bei einer PM-Spannung von 1,8 kV bei der Ultraschallzerstäubung.

tanzkriterium muß sich zwangsläufig die Akzeptanz verringern (Bild 8).

Die nächsten Untersuchungen wurden an einer Ultraschallzerstäubungsanlage vorgenommen. Der Meßort befand sich in einem Abstand von 30 cm senkrecht unterhalb des Zerstäubungspunktes. Bei dieser Versuchsreihe wurde neben den Einflüssen der oben besprochenen Parameter zusätzlich die Hochspannung der Photomultiplier variiert, stattdessen wurde das Kriterium SNR nicht wieder untersucht.

Die Meßergebnisse des Mittelwertes und der Akzeptanz über den variierten Parametern sind in den Bildern 9 bis 14 dargestellt. Sie bestätigen die vorhergehenden Untersuchungen. Der mittlere Partikeldurchmesser sinkt mit dem eingestellten Triggerpegel und mit wachsender Verstärkung (Bild 9 und 11). Bei der Akzeptanz ergeben sich – wie oben dargestellt – die gleichen Aussagen (Bild 10 und 12). Allerdings konvergiert im vorliegenden Fall die Akzeptanz gegen den Grenzwert eins. Die Veränderung der Photomultiplierhochspannung liefert keine zusätzliche

Aussage (Bild 13 und 14). Da mit wachsender Hochspannung die Verstärkung der Photomultiplier ansteigt, ergibt sich in der Tendenz die gleiche Aussage wie bei der Variation der Verstärkung. Zur Veranschaulichung sind in den Bildern 15 bis 18 die zugehörigen Anzahlverteilungen aufgetragen. Bei einer Hochspannung von 1,2 kV, also bei einer niedrigen Verstärkung, ergibt sich eine breite Verteilung mit einem mittleren Durchmesser von 17 µm (Bild 15). Bei einer Hochspannung von 1,8 kV, also bei einer größeren Verstärkung, ist der mittlere Durchmesser auf 8,8 µm abgesunken und die Verteilung deutlich schmaler geworden. Die kleinsten Teilchen weisen einen höheren Rauschanteil auf, der eine stärkere Streuung des Partikeldurchmessers bedingt. Die Form der Anzahlverteilung ist etwa Gauß-förmig. Eine Veränderung der Photomultiplierhochspannung führt zu einer Verschiebung der Verteilung auf der x -Achse, ohne daß sich deren Form ändert. Erst bei niedrigen Spannungen von 1,2 kV wird die Verteilung deutlich breiter und deren Maximalwert entsprechend niedriger. Zu beachten ist, daß bei einer hohen Verstärkung auch negative Phasendifferenzen erzeugt werden können, die sich aufgrund des auf einen von 0–360 Grad beschränkten Phasenmeßbereiches an der oberen Grenze des meßbaren Phasenbereiches ansiedeln und folglich bei der Umrechnung in Durchmesser zu Werten knapp unterhalb des Partikelgrößenmeßbereiches führen. Dieser Anteil, der sich aus der Faltung der durch den Rauschanteil bedingten Streuung des geschätzten Meßwertes ergibt, wurde hier nicht zur Berechnung der dargestellten Mittelwerte herangezogen.

4 Schlußfolgerungen

Vor der Durchführung einer PDA-Messung ist es wichtig, sich zu vergewissern, welchen Einfluß die unterschiedlichen, zu wählenden Parameter des Meßinstrumentes auf die gemessenen Verteilungen haben werden. Gegebenenfalls ist es sinnvoll, an dem zu untersuchenden, jeweils speziellen Prozeß Parameterstudien durchzuführen, um diesen Einfluß sehr genau zu ermitteln. An zwei Zerstäubungsprozessen wurde dieser Einfluß untersucht.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß mit größerer Empfindlichkeit des Meßgerätes, also mit einem niedrigeren Triggerpegel, mit einer höheren Verstärkung bzw. Photomultiplier-Spannung der gemessene mittlere Partikeldurchmesser abnimmt, daß also zunehmend noch kleine Teilchen erkannt werden, die andernfalls bei nicht optimaler Geräteeinstellung in den Verteilungen nicht erfaßt sind.

Als erste Einstellung ist es sinnvoll, sich an den kleinsten Teilchen zu orientieren und die Verstärkung und den Triggerpegel so einzustellen, daß diese noch detektiert werden. Wenn moderne Avalanche-Photodioden statt Photomultiplier zum Einsatz kommen, besteht hier die Gefahr der Übersteuerung durch die größten Partikel nicht mehr. Eine Signalanalyse, die auf der FFT basiert, ist ebenfalls übersteuerungsunempfindlich. Selbst von Signalen, die nur mit einem Bit quantisiert wurden, läßt sich noch der richtige Partikeldurchmesser ermitteln [2]. Allerdings ist die Streuung des gemessenen Partikeldurchmessers bei Übersteuerung (also bei großen Partikeln) deutlich erhöht.

Literatur

- [1] *Bauckhage, K.*: The phase-Doppler-difference method, a new laser-Doppler technique for simultaneous size and velocity measurement. Part. Part. Syst. Charact. 5 (1988), S. 16–22 und S. 66–71.
- [2] *Wriedt, T., Bauckhage, K. und Schöne, A.*: Application of Fourier Analysis to Phase-Doppler-Signals generated by Rough Metal Particles. IEEE Trans. Instrum. Meas. IM-38 (1989), S. 984–990.
- [3] *Wriedt, T., Heuermann, J., Dierks, U. und Bauckhage, K.*: Comparison of new Fourier processor with conventional counter processor. Proc. 4th Europ. Symp. Particle Characterization PARTEC '89, Nürnberg/FRG, 19.–21.4.1989, Preprints 2, S. 741–754.
- [4] *Lampe, K., Haase, B. und Bauckhage, K.*: Correlation of droplet size and main velocity components in the vicinity of a swirl-pressure burner nozzle. Proc. 5th Europ. Symp. Particle Characterization PARTEC '92, Nürnberg/Germany, 24.–26.3.1992, Preprints 1, S. 361–374.

Der Autor bedankt sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung der Arbeit.

Dr.-Ing. Thomas Wriedt, Universität Bremen, Verfahrenstechnik/FB Produktionstechnik, D-28334 Bremen.

Produktinformationen

Schichtdickenmeßgerät

Ziel der Entwicklung der Firma Automation Dr. Nix war es, ein Schichtdickenmeßgerät mit einem weiten Einsatzspektrum anzubieten. Einerseits sollte ein möglichst großer Meßbereich erfaßt werden, andererseits sollte aber auch auf verschiedenen metallischen Untergründen gemessen werden können.

Das Ergebnis dieser Entwicklung ist ein „Alleskönner“ mit dem Namen QuaNix 1500 mit einer beachtlichen Bandbreite: Der Meßbereich geht von 0 bis 5000 Mikrometer oder von 0 bis 200 mils (umschaltbar). Gemessen werden Schichten auf Stahl oder Eisen und zusätzlich, ohne eine Änderung am Gerät vornehmen zu müssen, alle isolierenden Schichten auf Nichteisenmetallen, also zum Beispiel auf Aluminium, Kupfer, Messing, Zink oder auch auf Edelstahl.

Die Meßsonden wurden beim QuaNix 1500 direkt in das Gerät integriert. Diese Bauweise, von den Geräten der Serie PosiTector her bekannt, erlaubt eine sehr praktische Einhandbedienung. Die kabel- und steckerlose Gerätekonstruktion erhöht darüber hinaus die Betriebssicherheit bei rauen Arbeitsbedingungen. Trotz des großen Meßbereiches mit einer hohen Auflösung des Meßwertes entfällt ein komplizierter und auch oft kostspieliger Sondenwechsel. Ebenso entfällt das meist umständliche und zeitaufwendige Kalibrieren. Tastaturfelder oder ein Ein- und Ausschalter sind überflüssig. Das Gerät arbeitet automatisch. Die besondere Gerätekonstruktion erlaubt das Messen an schwer zugänglichen Stellen und wird durch die Meßwertspeicherung und die Duplexanzeige erleichtert.

Automation Dr. Nix GmbH, Robert-Perthel-Straße 2, D-50739 Köln.

